

Les carnets

du GREC francilien

Le climat francilien et les grandes lignes du changement climatique en Île-de-France

Robert Vautard • Cécile de Munck

Nathalie de Noblet-Ducoudré • Isabelle Drouet



Groupement régional d'expertise sur le changement climatique
et la transition écologique en Île-de-France

• Points clefs •

Ce carnet a pour objectif de faire un point général sur le climat francilien, les changements observés jusqu'à aujourd'hui et leur attribution aux activités humaines, et les projections. Il traite principalement des changements physiques du climat.

Dans les évolutions observées jusqu'à aujourd'hui, pour l'Île-de-France, les signes du changement climatique depuis le milieu du XX^e siècle sont déjà très perceptibles : réchauffement moyen d'environ 2°C depuis 1950 pour un réchauffement global d'environ 1,1°C depuis le pré-industriel, vagues de chaleur en forte augmentation, les vagues de froid et gel en régression, pluies intenses en augmentation. L'augmentation récente (fréquence, intensité) des vagues de chaleur et la régression des vagues de froid sont attribuables aux activités humaines, et plus spécifiquement à l'émission de gaz à effet de serre.

L'urbanisation est un facteur majeur de modification du climat local. C'est le cas en particulier de la région parisienne, avec un îlot de chaleur marqué, induisant des températures urbaines pouvant être 10 degrés plus élevées qu'en zone rurale la nuit en période de canicule. La présence d'un couvert végétal dense, transpirant, en périphérie des villes comme à l'intérieur des villes, a le potentiel d'atténuer ces pics de chaleur.

Les évolutions observées vont se poursuivre pendant au moins une ou deux décennies, et possiblement au-delà en fonction de la rapidité de la réduction mondiale des émissions de gaz à effet de serre. Pour un réchauffement global de 1,5°C au-dessus de l'ère pré-industrielle, obtenu probablement d'ici une vingtaine d'années, nécessitant une neutralité carbone en 2050 ou avant, pour être stabilisé à ce niveau, les tendances régionales du changement climatique seront plus marquées qu'aujourd'hui, mais resteront limitées.

Pour un réchauffement global de 2°C (probablement atteint au milieu du siècle pour des scénarios médians à élevés), un réchauffement régional d'environ 0,5-1°C par rapport à aujourd'hui est projeté, ainsi qu'une modification du régime des pluies (plus fréquentes en hiver et plus rares en été), et un changement significatif dans certains extrêmes.

En résumé, les manifestations du changement climatique se font déjà sentir en 2020 de façon très claire. Leurs amplitudes à venir dépendront des actions d'atténuation et d'adaptation mises en œuvre dès aujourd'hui.

**Table
des matières**

00

Points clefs

01

Le climat francilien et
ses influences

02

Les évolutions
passées et leur
attribution aux
activités humaines

03

Les projections
futures

04

L'urbanisation

01

Le climat francilien
et ses influences

1.1 La climatologie francilienne et ses phénomènes importants

Le climat francilien est tempéré, avec une différence marquée entre hiver et été. Il est caractérisé par des températures pouvant avoir une grande amplitude de variations d'un mois à l'autre, d'une année à l'autre pour la même saison. Les moyennes mensuelles des températures, moyennées sur l'Île-de-France, et sur la période 1991-2020, varient de 4°C à 20°C (figure 1, à gauche), et l'amplitude des variations d'un même mois pour des années différentes est de l'ordre de 2-3°C typiquement. Les précipitations moyennes sous forme de pluie ou neige (figure 1, à droite) ont un cycle saisonnier peu marqué, mais une variabilité interannuelle très importante. De grands écarts peuvent en effet être observés d'une année à l'autre, avec des cumuls pouvant être trois fois plus importants ou dix fois moins élevés que la moyenne. Le climat de l'Île-de-France est donc très variable dans le temps. Il est également variable spatialement, principalement du fait de la grande hétérogénéité des surfaces, allant de grandes surfaces

agricoles ou forestières à la zone de la métropole densément artificialisée (voir ci-dessous, section 1.3 sur l'usage des sols). D'autres variables météorologiques sont importantes pour la vie des Franciliens et pour la nature en Île-de-France. L'ensoleillement total annuel est d'environ 1800 heures, similaire à l'ensoleillement des villes françaises situées à la même latitude. La variabilité de l'ensoleillement d'une année à l'autre est d'environ 100 heures. Les vitesses de vent sont généralement faibles à modérées sauf lorsque des systèmes dépressionnaires hivernaux génèrent des tempêtes et à l'occasion d'orages estivaux.

La région francilienne a une climatologie en léger dégradé d'océanique à continental en allant du Nord-Ouest au Sud-est, avec l'influence de l'urbanisation au centre (voir plus bas). Toutefois la quantification cartographiée de ces variations observées reste difficile avec le réseau actuel compte tenu de la très forte hétérogénéité de l'occupation des sols liée à l'urbanisation.

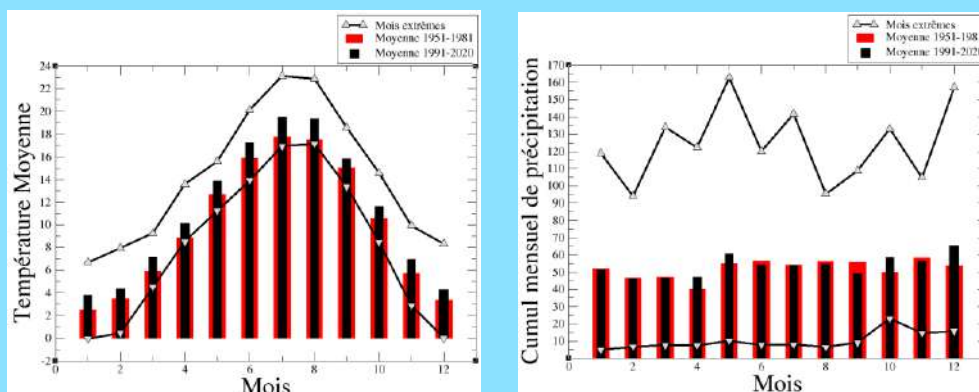


Figure 1. Variations mensuelles de température (en °C, à gauche) et cumul mensuel de précipitation (en mm, à droite), moyennées sur la région francilienne durant les périodes 1951-1981 et 1991-2020. Les triangles pointant vers le haut indiquent les températures moyennes maximales et les cumuls moyens de précipitations maximaux observés durant ces deux périodes, et ceux tournés vers le bas signalent les mois extrêmes froids ou secs. Source E-OBS, <https://climate.copernicus.eu>

Au-delà des moyennes climatologiques, les phénomènes régionaux météorologiques importants qui impactent la société, les secteurs d'activité et les écosystèmes en Île-de-France sont principalement : (1) des phénomènes thermiques (vagues de chaleur, vagues de froid et gel) ; (2) des sécheresses ; (3) des précipitations extrêmes (courtes ou sur plusieurs jours, épisodes neigeux) causant des inondations ; (4) des tempêtes ; (5) des épisodes de grande stabilité atmosphérique avec peu de vent causant notamment des épisodes aigus de pollution atmosphérique ou de pénurie de ressource éolienne. La combinaison de deux anomalies, simultanées ou décalées dans l'année, peut également constituer un phénomène impactant (un exemple marquant est la combinaison d'un hiver doux et d'un printemps pluvieux comme en 2015-2016, engendrant une perte de rendement agricole pour le blé¹). Ces phénomènes font l'objet d'un carnet portant spécifiquement sur les extrêmes et les risques climatiques franciliens.

L'Île-de-France, comme toute autre région, est également affectée indirectement par des phénomènes météorologiques se produisant ailleurs. On peut citer par exemple

l'hydrologie du bassin de la Seine qui dépasse largement la région francilienne, ainsi les crues de la Seine en Île-de-France sont influencées par la météorologie et l'usage des sols en amont de la région. Des événements extrêmes comme de grandes vagues de chaleur et sécheresse se produisant sur une ou plusieurs grandes régions productrices en céréales peuvent impacter les prix des céréales ou de l'énergie avec des impacts économiques pour les Franciliens, comme pour les habitants d'autres régions.

La plupart des phénomènes météorologiques impactants sont dus à une « variabilité naturelle » du climat intra-francilien, indépendante du changement climatique. Cette variabilité est liée à la température des mers et océans qui bordent la France, à la circulation des vents sur l'Atlantique Nord et l'Europe (section 1.2). Pourtant, les caractéristiques de ces phénomènes, fréquence, intensité, extension spatiale, sont altérées par la réponse climatique à l'augmentation globale des gaz à effet de serre. Elles sont par ailleurs sensibles à l'évolution locale de l'usage des sols et notamment à l'urbanisation (section 1.3) et à la pollution atmosphérique (sections 1.4, 1.5).

¹ Ben-Ari, T., Boé, J., Ciais, P., Lecerf, R., Van der Velde, M., & Makowski, D. (2018). Causes and implications of the

unforeseen 2016 extreme yield loss in the breadbasket of France. *Nature communications*, 9(1), 1-10.



1.2 Pourquoi un climat naturellement si variable en Île-de-France

Le climat francilien est proche des climats océaniques de la façade Ouest de l'Europe. Comme les vents dominants sont d'Ouest à Sud-Ouest, il est largement influencé par les températures de l'océan Atlantique Nord, et par les perturbations océaniques qui se forment à proximité des côtes américaines et qui traversent l'Atlantique. Bien que l'Océan Atlantique Nord subisse peu de variations de température de surface d'une année à l'autre, il n'est pas rare de voir des mois ou des saisons dévier fortement de la climatologie (voir la figure 1). Cela est dû essentiellement à la circulation des vents sur l'Atlantique Nord et en Europe, qui est très irrégulière. Celle-ci se caractérise assez bien par plusieurs « régimes de temps »² pour lesquels la circulation atmosphérique reste généralement persistante plusieurs jours ou semaines, et qui produisent des phénomènes très différents localement en Île-de-France. L'un de ces régimes, le « blocage », engendre des vents d'Est-

Nord-Est, induisant des vagues de froid intense en hiver et des sécheresses et vagues de chaleur en été. Un autre de ces régimes persistants est caractérisé par des vents de Sud-Ouest renforcés et engendre un temps doux et humide accompagné de tempêtes en hiver et de forts cumuls de précipitations.

Ces circulations de vents qui sont à l'origine d'un temps chaud ou froid, sec ou humide, s'accompagnent de mécanismes locaux d'amplification ou d'atténuation en raison de leurs effets différents selon la nature de la surface terrestre, urbaine ou forestière par exemple). Une séquence chaude prolongée sans précipitation en été dans une zone rurale engendre une sécheresse des sols qui, à son tour, déséquilibre le bilan d'énergie au sol et amplifie la chaleur. Des surfaces enneigées en hiver empêchent les températures diurnes d'augmenter car le sol ne se réchauffe pas. Ces mécanismes sont également altérés par le changement climatique (voir section 1.5).

² Michelangeli, P. A., Vautard, R., & Legras, B. (1995). Weather regimes: Recurrence and quasi stationarity. *Journal of the atmospheric sciences*, 52(8), 1237-1256;

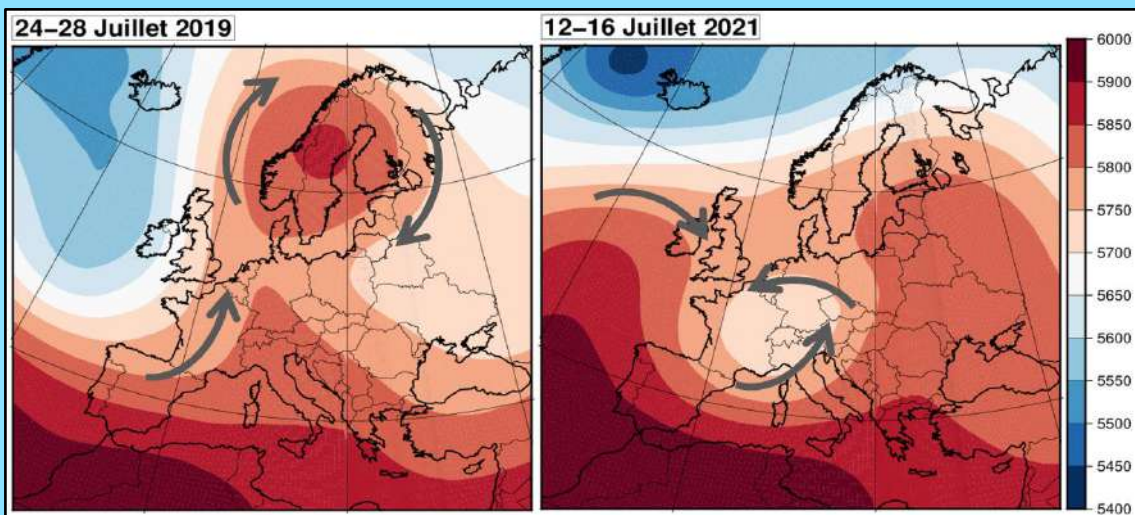
Cassou, C., Terray, L., & Phillips, A. S. (2005). Tropical Atlantic influence on European heat waves. *Journal of climate*, 18(15), 2805-2811.

Juillet 2019 et juillet 2021 : chaleur et pluie extrêmes, des présages du climat futur ?

En juillet 2019 et en juillet 2021 la situation météorologique a créé des événements extrêmes qui caractérisent assez bien d'une part la variabilité du climat estival, avec des régimes de temps très différents, et d'autre part le type d'extrêmes qui marquent la trace du changement climatique. Fin juillet 2019, une canicule sans précédent touche l'Europe de l'Ouest, de la France à la Scandinavie, avec des records de températures battus un peu partout (plus de 43°C en région parisienne, plus de 42°C en Allemagne du Nord...). Mi-juillet 2021, une « goutte froide » crée des pluies extrêmes sur les Ardennes belges et sur le Sud-Ouest de l'Allemagne, avec des inondations elles aussi sans précédent. En 2019, la circulation des vents (représentée ci-dessous) a un « blocage en omega », caractéristique des situations entraînant des fortes températures en été. Les masses d'air surchauffées sur l'Espagne remontent lentement vers le nord jusqu'à la Scandinavie. Ce grand méandre chaud s'est ensuite détaché et a formé une bulle chaude qui s'est propagée vers le Groënland, induisant là aussi des températures extrêmes (la « bulle chaude » est parfois appelée « dôme de chaleur »).

En 2021, c'est une situation inverse qui se produit, avec un « omega inversé » appelé aussi « goutte froide » à cause de la présence d'air froid en altitude au-dessus de l'Europe de l'ouest. Dans ce cas, l'atmosphère chaude située autour de la goutte froide, en Méditerranée et sur l'Atlantique l'alimente et la charge en air humide, si bien que la goutte froide va déverser des pluies torrentielles pendant deux jours en Allemagne et au Bénélux.

Ces circulations atmosphériques, génératrices d'impact, ne sont pas sensiblement plus fréquentes aujourd'hui que par le passé, mais leurs conséquences sont aggravées par le changement climatique³ : des températures plus extrêmes dans le premier cas, des pluies plus extrêmes dans l'autre. Ces événements, créés par des écarts de circulation des vents de grande échelle spatiale, alertent car ils peuvent créer des impacts à grande échelle. En Île-de-France, l'urbanisation peut constituer un facteur aggravant du fait de l'îlot de chaleur urbain, qui engendre des fortes températures, et du ruissellement, qui est accentué par les pluies extrêmes).



Carte de la hauteur (en m) de la surface de pression 500 hPa en moyenne du 24 au 28 juillet 2019 (gauche) et du 12 au 16 juillet 2021 (droite) illustrant la circulation des vents en altitude avec pour conséquences des situations extrêmes sur ces deux périodes (canicule extrême en 2019 et pluies extrêmes en 2021).

³ Philip, et al. (2021): <https://www.worldweatherattribution.org> ; Vautard, R., van Aalst, M., Boucher, O., Drouin, A., Hausteijn, K., Kreienkamp,

F., ... & Wehner, M. (2020). Human contribution to the record-breaking June and July 2019 heatwaves in Western Europe. *Environmental Research Letters*, 15(9), 094077.

1.3 Influence de l'usage des sols

L'occupation des sols (zones imperméabilisées, forêt, agriculture, friches, etc.) et l'usage que nous en faisons (par exemple irrigation ou non d'un champ cultivé) influencent le climat local et régional en perturbant les échanges d'énergie thermique ou dynamique, d'eau, de gaz à effet de serre et de polluants entre la surface et l'atmosphère. Ces échanges influencent le confort hydro-thermique de notre air ambiant, ainsi que sa qualité, la vitesse et la direction des vents, l'intensité des précipitations. Ils affectent aussi l'intensité de plusieurs événements extrêmes comme les canicules et les fortes précipitations.

Les modifications des échanges entre surfaces et atmosphère est due aux propriétés des surfaces telles que leur pouvoir réfléchissant (albédo), leur rugosité, leur capacité à évaporer de l'eau ou au contraire leur imperméabilité. Une forêt, par exemple, est en général verte plus longtemps dans l'année qu'une zone agricole ou, *a fortiori*, qu'une ville. Plus dense, elle transpire plus. En la coupant, on renvoie donc moins de vapeur d'eau vers l'atmosphère, l'atmosphère s'assèche, ce qui peut conduire à une diminution des précipitations. Mais cette diminution des pluies ne se produit pas forcément là où la déforestation a eu lieu. Cette masse d'air plus sèche peut en effet être transportée par les vents loin de son origine. La transpiration n'est pas seulement un transfert de vapeur d'eau, c'est aussi un transfert de chaleur. Quand une surface transpire, elle se refroidit et refroidit également l'air ambiant. En période de canicule une forêt ou un espace vert urbain restent plus frais qu'une zone urbaine ou qu'un champ agricole venant d'être fauché.

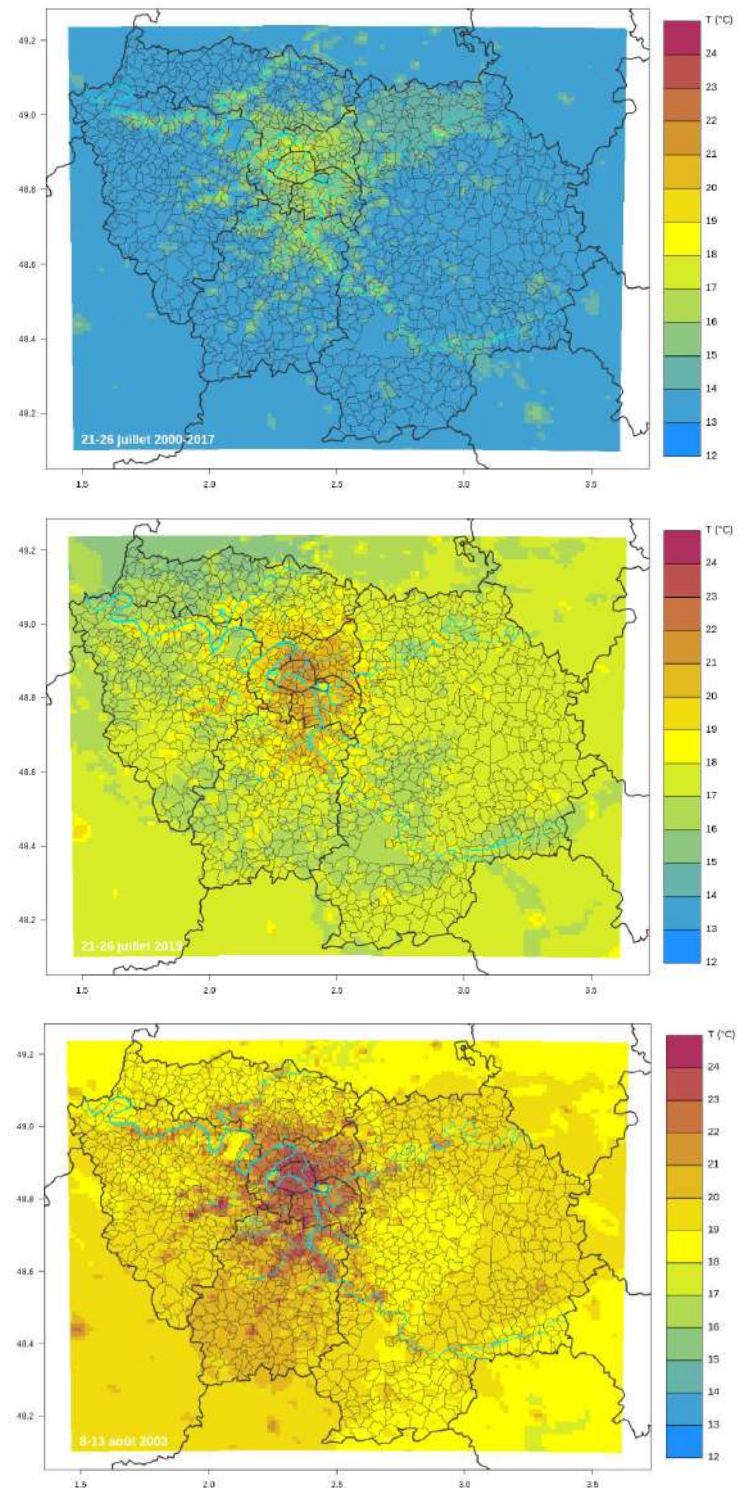


Figure 2. Température minimale moyenne à l'échelle de l'Île-de-France : **(au centre)** pendant la canicule de 2019 (21-26 juillet), **(en haut)** même période entre 2000-2017, **(en bas)** pendant la canicule de 2003 (8-13 août). Source : Météo France/DIRIC. Remerciements : A. Lemonsu.

L'urbanisation des sols induit une perturbation très significative du climat régional, en générant un *îlot de chaleur urbain (ICU)*, comparable à un dôme thermique. Il s'établit surtout la nuit, avec des températures de l'air de plus en plus chaudes au fur et à mesure que l'on se rapproche des centres urbains. Pour une grande agglomération comme Paris, l'écart observé entre les

températures des zones les plus denses du centre-ville et la campagne environnante est de l'ordre de 4°C sous des conditions estivales standards (figure 2, haut) mais peut atteindre des valeurs beaucoup plus élevées, de l'ordre de 8-10°C, en période de canicule, comme récemment en 2019 ou en 2003 (figure 2).



Valeurs remarquables des pics d'ICU parisien observés ces dernières années*

* Source : APC et Météo France (2018)⁴.

Ce micro-climat typique des zones urbaines s'explique principalement par l'imperméabilisation et l'artificialisation des sols en ville. Ces deux altérations modifient les échanges radiatifs, énergétiques, thermiques, hydriques et dynamiques entre la surface et les basses couches de l'atmosphère : contrairement à la campagne qui peut dissiper une grande partie du rayonnement solaire reçu en journée par évapotranspiration⁵, les infrastructures urbaines accumulent une grande partie de ce rayonnement dans leurs matériaux. Au cours de la nuit ces matériaux

artificiels se refroidissent en restituant aux basses couches de l'atmosphère cette chaleur emmagasinée pendant la journée. Cette accumulation de chaleur est exacerbée par d'autres phénomènes caractéristiques des zones urbaines : le piégeage du rayonnement solaire visible et infrarouge causé par la morphologie en canyon urbain des rues, un écoulement de l'air freiné par des obstacles qui confèrent au milieu urbain une rugosité plus élevée qu'en milieu naturel, sans oublier des émissions de chaleur d'origine anthropique⁶ de nuit comme de jour.

⁴ APC et Météo France (2018) : https://www.apc-paris.com/system/files/file_fields/2018/11/07/icu-brochureapc-mf.pdf

⁵ L'évapotranspiration regroupe l'évaporation de l'eau contenue dans les sols et la transpiration des plantes.

⁶ Relative aux activités humaines (rejets de chaleur liés à la climatisation des infrastructures, au trafic routier, à l'industrie, etc.).

1.4 Influence des polluants atmosphériques

La pollution atmosphérique francilienne, due aux émissions polluantes de la région ou d'autres régions, a une influence sur les températures régionales et, dans une moindre mesure, sur les précipitations. C'est principalement la pollution particulaire qui modifie les conditions climatiques régionales, la pollution gazeuse (ozone, méthane) contribuant à l'effet de serre au niveau global. L'effet sur les températures dépend des polluants. Les polluants ont deux effets : un effet de renvoi du rayonnement solaire et un

effet d'absorption d'énergie. Les sulfates renvoient le rayonnement solaire alors que la suie l'absorbe. Avec l'amélioration de la qualité de l'air en Europe de l'Ouest par les réductions d'émissions polluantes, le rayonnement a augmenté depuis les années 1970-1980. Plusieurs études montrent que ce phénomène aurait induit une augmentation des températures, durant les cinquante dernières années.

1.5 Comment le changement climatique altère ces phénomènes et facteurs

Le changement climatique agit directement sur tous les phénomènes décrits précédemment. Il modifie les températures globales mais aussi régionales, en Île-de-France comme ailleurs, avec des amplitudes qui varient selon les régions. Cela est dû principalement au réchauffement des océans et, pour l'Europe de l'Ouest, à l'Atlantique Nord, à la chaleur supplémentaire qui se retrouve dans les masses d'air qui arrivent sur l'Île-de-France, mais aussi à une atmosphère directement plus chargée en gaz à effet de serre, incluant la vapeur d'eau. L'ensemble de ces facteurs provoque une modification locale et régionale du bilan d'énergie en surface.

Le changement climatique modifie également la fréquence, l'intensité et la durée des phénomènes extrêmes mentionnés plus haut :

- **augmentation des vagues de chaleur et diminution des vagues de froid** en fréquence, intensité et durée, en raison de l'augmentation de la température globale

atmosphérique et océanique et des mécanismes d'amplification,

- **augmentation des sécheresses** en fréquence, intensité et durée, car les changements éventuels de cumuls de précipitation ont des effets dominés par ceux de l'augmentation de la température induisant une augmentation de l'évapotranspiration et des sols plus secs,
- **augmentation des pluies extrêmes** en fréquence et en intensité car l'atmosphère plus chaude est plus chargée en vapeur d'eau, avec plus ou moins d'intensité selon la saison, la durée des pluies considérée. Evolution incertaine des crues et étiages de la Seine, du fait des modifications du fleuve s'ajoutant à d'éventuelles tendances dues au climat,
- **peu d'évolution des tempêtes et stagnations**, car les circulations des vents évoluent peu.

Ces évolutions des extrêmes sont évoquées ci-dessous de façon très résumée, et détaillées dans un carnet du GREC portant spécifiquement sur les extrêmes et les risques.

02

Les évolutions passées
et leur attribution aux activités
humaines

2.1 Les évolutions les plus marquantes depuis le début du XX^e siècle

Les températures en Île-de-France ont augmenté d'environ 2°C depuis le milieu du XX^e siècle. Cette tendance est assez similaire au réchauffement observé au niveau national. Elle concerne tous les mois, avec une différence de température d'environ 1 à 2 degrés selon les mois entre les moyennes de 1951-1980 et celles de 1991-2020 (figure 1).

Toutefois, une évolution très rapide est observée depuis le milieu du XX^e siècle en

été, où un réchauffement de 2,6°C est observé depuis lors (0,37°C/décennie), alors que les températures hivernales se sont réchauffées de 1,8°C (0,25°C/décennie, figure 3). Les 5 étés les plus chauds en Île-de-France, depuis 1950 sont, par ordre décroissant, 2003, 2018, 2020, 1976, 2019. Les trois derniers étés sont donc parmi les 5 plus chauds, et entre 2015 et 2020, les étés sont tous plus chauds que tous ceux de la période 1950-1975.

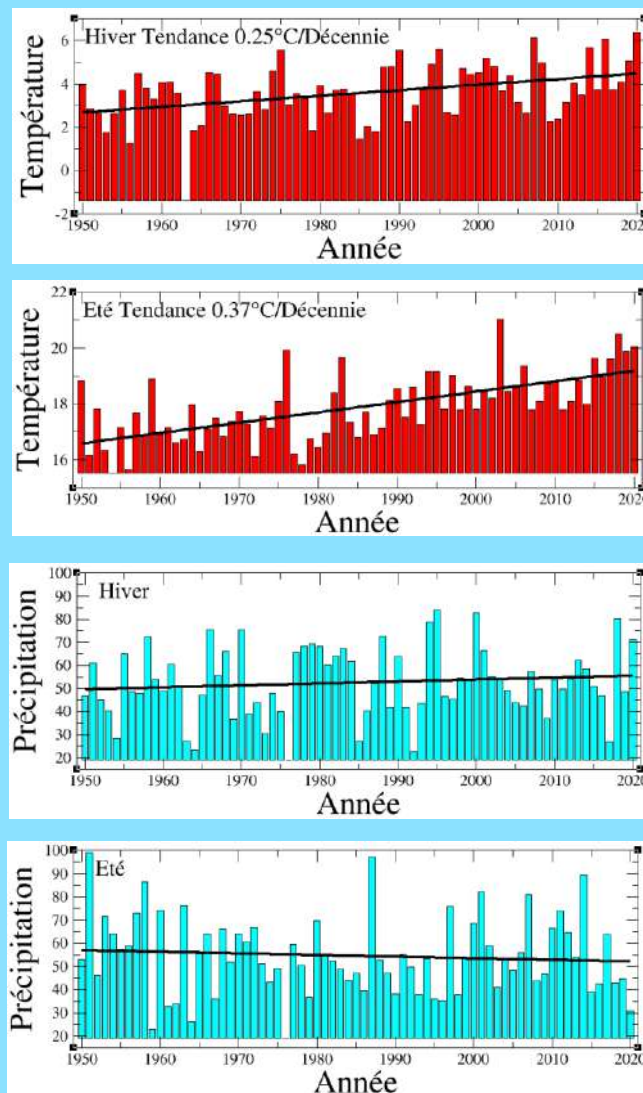


Figure 3. Évolution des températures moyennes hivernales (décembre à février) et estivales (juin à août) sur l'Île-de-France et des cumuls de précipitations mensuels moyens depuis 1950 (source E-OBS, C3S).

Cette forte augmentation de température en été est retrouvée aussi ailleurs en Europe de l'Ouest⁷ et l'évolution estimée pour l'Île-de-France par degré de réchauffement (2,5°C/°C) est similaire à celle trouvée sur toute l'Europe de l'Ouest. Il est donc peu probable que cette tendance soit due aux effets d'urbanisation dans la région. Les évolutions des températures saisonnières prises sur plusieurs stations de l'Île-de-France sont très similaires à quelques dixièmes de degré près. À l'échelle de la région parisienne, ce réchauffement s'est aussi traduit ces 40 dernières années par un réchauffement des températures maximales en journée plus rapide que celui des minimales nocturnes, notamment au printemps et en été⁸.

Les précipitations n'ont pas de tendance de long terme significative, mais une légère augmentation (diminution) est observée en hiver (été) (figure 3). Ces légères tendances peuvent être liées spécifiquement aux changements de circulations atmosphériques, avec une légère augmentation des circulations favorables aux forts cumuls pour l'hiver et faibles cumuls pour l'été, mais les études ne montrent pas de résultats totalement concordants⁹. Ces tendances peuvent égale-

ment résulter de la réponse thermodynamique au changement climatique (vapeur d'eau plus abondante).

Les vitesses moyennes de vent diminuent en Europe et dans beaucoup de régions des latitudes tempérées terrestres de l'hémisphère Nord, comme par exemple sur le site de l'aéroport d'Orly. Plusieurs études montrent que cette tendance générale est due à une combinaison de variabilité à long terme et d'augmentation de la rugosité de la surface (urbanisation, augmentation des forêts).

Les tendances observées sur les extrêmes sont détaillées dans le carnet sur les *extrêmes et les risques climatiques*, mais nous rappelons ici en bref leurs principales caractéristiques pour l'Île-de-France : augmentation (resp. diminution) significative de l'intensité, la fréquence et la durée des vagues de chaleur (resp. vagues de froid) ; augmentation faible des précipitations extrêmes au long de l'année sur les 70 dernières années et diminution du nombre et de l'intensité des tempêtes de vent.

2.2 Les évolutions attribuables à l'augmentation des gaz à effet de serre

Les tendances observées peuvent être dues à plusieurs causes : fluctuations naturelles lentes, aléatoires ou causées par des modifications solaires ou du volcanisme, ou tendances répondant aux activités humaines (gaz à effet de serre, aérosols, changement d'usage des sols). Afin de déterminer si les tendances observées sont attribuables aux activités humaines (par abus de langage on dit souvent « au changement climatique »), il est indispensable d'utiliser des simulations

climatiques qui, après évaluation, permettent de déterminer la réponse des variables climatiques au seul changement de gaz à effet de serre d'origine anthropique. Au niveau global, les gaz à effet de serre additionnels et aérosols émis par les activités humaines expliquent les changements de température. En revanche, au niveau régional, les variations naturelles chaotiques sont plus fortes et les tendances sont souvent plus difficiles à discerner, et peuvent être largement

⁷ van Oldenborgh *et al.* (2007) <https://cp.copernicus.org/articles/5/1/2009/>

⁸ Ringard, J., Chiriaco, M., Bastien, S. & Habets, F. (2019) Recent trends in climate variability at the local scale using

40 years of observations: the case of the Paris region of France. *Atmos. Chem. Phys.* 19, 13129-13155.

⁹ Fleig *et al.* 2015 <https://hess.copernicus.org/articles/19/3093/2015/>

influencées par les changements régionaux dans l'usage des sols ou les tendances de la pollution atmosphérique.

L'augmentation des températures franciliennes jusqu'à aujourd'hui est largement attribuable à l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les simulations régionales montrent un réchauffement régional de l'ordre de $\sim 1,3^{\circ}\text{C}$ en hiver et $\sim 1,2^{\circ}\text{C}$ en été depuis le pré-industriel (figure 4), des valeurs très sensiblement moins élevées que le réchauffement observé depuis 1950 ($1,8^{\circ}\text{C}$ en hiver et $2,5^{\circ}\text{C}$ en été). Ces différences, en été, restent encore largement incomprises¹⁰. Elles peuvent être dues à l'effet de changements dans la pollution atmosphérique notamment par la diminution des sulfates réfléchissants encore mal prise en compte dans ces simulations régionales, ou d'autres incertitudes dans les modèles, notamment sur les phénomènes nuageux, très importants en été. En hiver, les simulations sont davantage en accord avec les observations (voir figure 3) et les différences peuvent s'expliquer par l'incertitude. L'absence de changements significatifs dans les précipitations est également simulée par les modèles climatiques.

La baisse observée des vitesses de vent et de l'intensité des tempêtes n'est pas attribuable au changement climatique. Il existe peu d'études sur cette question pour la région francilienne ou les régions voisines. Plusieurs études montrent que la réduction observée des vents pourrait être une combinaison d'une augmentation de la rugosité de la surface (urbanisation et croissance des forêts) et de variations naturelles de grande échelle.

Pour les extrêmes climatiques, le lecteur est renvoyé au carnet du GREC spécifique. D'une manière générale, l'augmentation de l'intensité et de la probabilité des vagues de chaleur en Île-de-France comme en Europe de l'Ouest est attribuable au changement climatique, et là encore une sous-estimation de cette évolution est présente dans les simulations climatiques. Des études récentes montrent que les grandes canicules de la fin des années 2010 et du début des années 2020 ont une probabilité qui a au moins doublé mais probablement bien davantage. L'intensité de ces canicules a augmenté de $1,5^{\circ}\text{C}$ à 3°C , sous l'effet des activités humaines. Pour les pluies extrêmes, les sécheresses, le signal du changement climatique reste jusqu'à aujourd'hui largement masqué par la variabilité interne du climat. En conséquence, les tendances ne sont pas statistiquement significatives et ne sont généralement pas attribuables au changement climatique.

¹⁰ van Oldenborgh, G. J., Drijfhout, S., Van Ulden, A., Haarsma, R., Sterl, A., Severijns, C., ... & Dijkstra, H. (2009).

Western Europe is warming much faster than expected. *Climate of the Past*, 5(1), 1-12.

03

Les projections futures :

l'exposition des Franciliens
à un réchauffement global de 1,5°C,
de 2°C et au-delà, et ses conséquences

3.1 Le climat francilien moyen pour 1,5°C et 2°C (et au-delà) de réchauffement global

Le climat futur, en Île-de-France comme ailleurs, dépendra des émissions de gaz à effet de serre globales. Si le climat global subit un réchauffement comme celui prévu dans les accords de Paris en 2015, inférieur à 2°C (voire 1,5°C) par rapport à la période pré-industrielle, la hausse des températures restera limitée. Pour un réchauffement de 2°C globalement, on estime que le climat régional se réchauffera de 0,5 à 1°C supplémentaires par rapport à la situation en 2021 pour les différentes saisons (figure 3¹¹), en valeur médiane, avec des variations d'une année à l'autre. La limitation à 1,5°C du réchauffement global conduirait à quelques dixièmes de réchauffement supplémentaires, un climat proche de l'actuel. Le rapport « DRIAS » (DRIAS, 2021) montre que le scénario RCP2.6 (2 chances sur trois de rester en dessous de 2°C globalement) conduit, sur la France métropolitaine, à un réchauffement d'environ 1°C par rapport à la période 1976-2005, et se différencie à partir de 2030 des autres scénarios, montrant un bénéfice déjà présent dans la décennie 2030-2040, mais largement accru dans les décennies suivantes et au-delà de 2050. Il faut néanmoins s'attendre à ce que la variabilité d'une année/décennie à l'autre domine les tendances d'ici 2040, sur fond d'augmentation générale des températures.

Un réchauffement global de 2°C et au-delà mènera les températures saisonnières franciliennes dans un intervalle de valeurs complètement nouveau par rapport à l'ère pré-industrielle. Pour un réchauffement global de 2°C, les saisons les plus froides,

été comme hiver, correspondent à des saisons moyennes sans altération du climat, et les saisons les plus chaudes pré-industrielles deviennent la norme (figure 3). Pour 4°C de réchauffement global, les étés les plus froids correspondent aux étés extrêmes les plus chauds pré-industriels, et les étés les plus extrêmes récents (2003, 2018 par exemple) ont des températures en dessous de la médiane du climat globalement 4°C plus chaud. À l'échelle du bassin parisien, en prenant en compte l'îlot de chaleur urbain, le réchauffement à la fin du siècle pour des scénarios A1B/A2 se traduira par une augmentation des températures minimales/maximales de l'ordre de +2.0/+2.4°C en hiver et +3.5/+5.0°C (en été)¹².

Les cumuls annuels de précipitations n'ont, dans un climat stabilisé à 1,5°C ou 2°C, pas de tendance marquée, avec pourtant un accroissement des précipitations en hiver et une baisse des précipitations en été. Les projections climatiques donnent, de façon générale, des cumuls plus forts en Europe du Nord et des cumuls plus faibles en Europe du Sud, avec une incertitude sur le signe qui diminue avec le degré de réchauffement¹³ ou avec le temps au cours du XXI^e siècle pour un scénario comme le RCP8.5 ou RCP4.5. L'Île-de-France se situe dans la zone où les changements sont incertains, avec néanmoins une légère augmentation des précipitations en hiver et une diminution en été en moyenne sur chaque ensemble de projections climatiques récentes. Pour un réchauffement global de 2°C, l'augmentation en hiver est

¹¹ Kjellström *et al.*, 2018.

¹² Lemonsu, A., Kounkou-Arnaud, R., Desplat, J., Salagnac, J.-L. & Masson, V. (2013). Evolution of the Parisian urban climate under a global changing climate. *Climatic change* 116, 679–692.

¹³ Kjellström, E., Nikulin, G., Strandberg, G., Christensen, O. B., Jacob, D., Keuler, K., ... & Vautard, R. (2018). European

climate change at global mean temperature increases of 1.5 and 2 C above pre-industrial conditions as simulated by the EURO-CORDEX regional climate models. *Earth System Dynamics*, 9(2), 459-478.

<https://esd.copernicus.org/articles/9/459/2018/>

dans la fourchette de 5 à 10 %. En été, la diminution est de 0 à 5 %. Ces tendances, non significatives dans les simulations climatiques européennes, induisent donc une amplification du caractère saisonnier des précipitations. Dans l'hypothèse de réchauffement supérieur à 2°C, elles deviennent davantage significatives, avec des précipitations en hiver en augmentation d'environ 10-20 % et en diminution en été de 10-20 %. La combinaison d'une baisse des pluies en été et d'une augmentation de la demande évaporative de l'atmosphère amplifiera l'effet de sécheresse sur l'humidité des sols¹⁴.

Les vitesses de vents moyennes annuelles n'ont pas d'évolution marquée dans des scénarios conduisant à des réchauffements inférieurs à 2°C. Les projections montrent toutefois une légère diminution des vitesses de vent, de l'ordre de 5-10 %, particulièrement en été¹⁵. Pour un réchauffement plus important, dans la seconde moitié du siècle, une baisse de la vitesse des vents est projetée, mais elle resterait inférieure à 10 %¹⁶.

Plusieurs types d'événements extrêmes (canicules, vagues de froid, pluies extrêmes, sécheresses) sont projetés avec une évolution marquée. Les projections donnent une augmentation significative de la probabilité, de l'intensité et de la durée des vagues de chaleur. Comme pour les températures moyennes, les températures les plus fortes subiront une augmentation significative selon tous ces axes. Les canicules (définies dans la référence sui-

vante comme les moyennes de températures sur 5 jours extrêmes) de la fin du XX^e siècle avec une période de retour de 20 ans verront cette période de retour diminuer d'un facteur au moins 3 dans un climat 1,5°C plus chaud, d'un facteur au moins 5 pour 2°C de réchauffement et au moins 10 pour 3°C de réchauffement¹⁷. Le rapport DRIAS utilise une définition différente des canicules (périodes d'au moins 5 jours consécutifs avec une température supérieure de 5°C à la moyenne locale), et trouve une augmentation, par rapport à la fin du XX^e siècle, du nombre de jours très différenciée selon les scénarios, en fin de siècle (de quelques jours pour RCP2.6 à quelques dizaines de jours pour RCP8.5). Il montre aussi que les vagues de froid sont projetées en nette régression, les tempêtes sont en légère augmentation¹⁸.

Dans tous les scénarios, les pluies extrêmes sont projetées en augmentation, jusqu'à 10 % en milieu de siècle et 30 % en fin de siècle par rapport à la fin du XX^e siècle. Une augmentation des sécheresses est également projetée. Cette augmentation dépend du degré de réchauffement global. Pour le milieu de siècle, ou pour un réchauffement global d'environ 2°C, les simulations projettent une augmentation, par rapport à la fin du XX^e siècle, des intensités des pluies journalières extrêmes, inférieure à 10 %, avec des variations selon les indices¹⁹. Pour des degrés de réchauffement supérieurs, en fin de siècle, l'augmentation de l'intensité des précipitations extrêmes par rapport à la fin du XX^e siècle se situe dans l'intervalle entre 10 % et

¹⁴ Seneviratne *et al.*, 2010.

¹⁵ Kjellström *et al.*, 2018.

¹⁶ Tobin, I., Greuell, W., Jerez, S., Ludwig, F., Vautard, R., Van Vliet, M. T. H., & Breón, F. M. (2018). Vulnerabilities and resilience of European power generation to 1.5 C, 2 C and 3 C warming. *Environmental Research Letters*, 13(4), 044024.

¹⁷ Jacob, D., Kotova, L., Teichmann, C., Sobolowski, S. P., Vautard, R., Donnelly, C., ... & van Vliet, M. T. (2018).

Climate impacts in Europe under + 1.5 C global warming. *Earth's Future*, 6(2), 264-285.

¹⁸ Vautard, R., van Oldenborgh, G. J., Otto, F. E., Yiou, P., de Vries, H., van Meijgaard, E., ... & Tebaldi, C. (2019). Human influence on European winter wind storms such as those of January 2018. *Earth System Dynamics*, 10(2), 271-286.

¹⁹ Rapport DRIAS 2020 : <http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>

30 %²⁰. Un réchauffement inférieur à 2°C induira peu de changement dans les sécheresses météorologiques (absence de jours de pluie), mais au-delà de 2°C, une augmentation significative est projetée en été, et les indicateurs de sécheresse du sol montrent tous une augmentation de leur intensité dans les scénarios futurs. Les sécheresses météorologiques printanières peuvent également être problématiques, pour l'agriculture ou pour la génération d'épisodes de pollution particulaire, mais n'ont pas d'évolution claire dans le passé ni dans les projections pour ces degrés de réchauffement.

Les crues et inondations ne dépendent pas que des extrêmes de pluie mais aussi de l'adaptation des bassins versants. Les crues de la Seine ne montrent pas aujourd'hui de tendance marquée, et la gestion du bassin versant devrait pouvoir permettre d'absorber des précipitations plus intenses, jusqu'à un certain point. Enfin, en conséquence de l'augmentation d'intensité des pluies extrêmes « courtes » (un jour voire quelques heures), les « crues et inondations éclair » devraient être en augmentation selon les adaptations locales de l'artificialisation des sols et des systèmes d'évacuation.

3.2 Les secteurs les plus impactés et la nécessité d'adaptation

Les impacts du changement climatique sur les secteurs d'activités et sur les écosystèmes seront décrits dans des carnets séparés. Nous en rappelons ici les principaux éléments sans détailler. La littérature est très riche dans ce domaine, et en forte évolution. Elle est peu fournie pour la région spécifiquement et reste souvent générique.

- Pour l'eau, l'augmentation des sécheresses et vagues de chaleur l'été nécessitera des restrictions de l'utilisation de l'eau, particulièrement en été.
- Pour l'agriculture, les rendements sont altérés par les vagues de chaleur et sécheresses.
- Pour l'énergie, l'augmentation des températures entraîne essentiellement une baisse de la consommation d'énergie pour le chauffage. D'autres effets comme les inondations et les vagues de chaleur ont des conséquences ponctuelles sur les systèmes électriques. La modification du

rayonnement, encore incertaine dans les scénarios climatiques, pourrait entraîner un changement dans le gisement solaire.

- Pour la santé, le changement climatique entraîne de la surmortalité en raison de l'accroissement de certains phénomènes extrêmes, des risques d'augmentation de certaines maladies infectieuses ou à vecteurs.
- Pour les transports et les infrastructures, les phénomènes extrêmes en augmentation (vagues de chaleur, pluies extrêmes) ont pour conséquences potentielles des ruptures de réseaux et des dommages dans les infrastructures.
- Pour le bâtiment, les changements liés à la température sont de nature à modifier très sensiblement le confort intérieur, particulièrement en été et lorsque l'isolation est faible.

²⁰ Coppola *et al.* (2021)

<http://dx.doi.org/10.1029/2019id032356>

04

L'urbanisation

4.1 Les scénarios d'urbanisation

On l'a vu, les villes sont particulièrement vulnérables aux vagues de chaleur en raison de l'effet d'îlot de chaleur urbain qui amplifie les températures dans les zones urbanisées. Les impacts, sur le stress thermique et la consommation d'énergie notamment, dépendront des infrastructures en place, des politiques de planification, des types d'habitations et des modes de vie. Les politiques d'aménagement du territoire, en raison de leur impact durable sur la taille et la forme des villes, peuvent

avoir une influence majeure sur l'évolution des risques associés aux vagues de chaleur dans les villes. Dans le cadre du projet VURCA [Vulnérabilité Urbaine aux épisodes Caniculaires et stratégies d'Adaptation, [VURCA](#)], cinq scénarios prospectifs d'urbanisation ont été construits pour l'agglomération parisienne pour être ensuite simulés et évalués pour des canicules futures²¹ (figure 4). En termes d'expansion urbaine pure, trois familles de scénarios prospectifs ont été proposées.

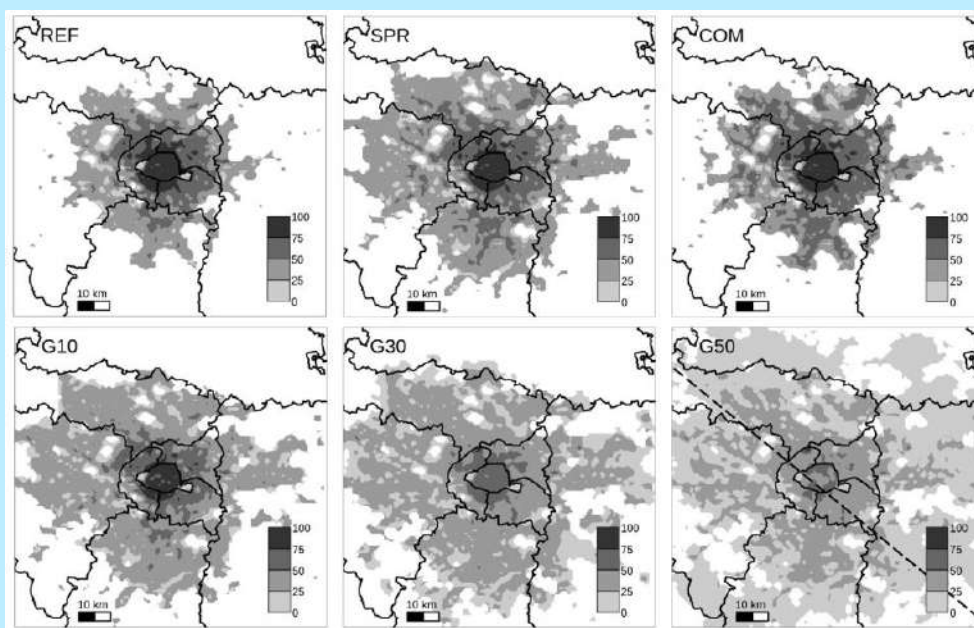
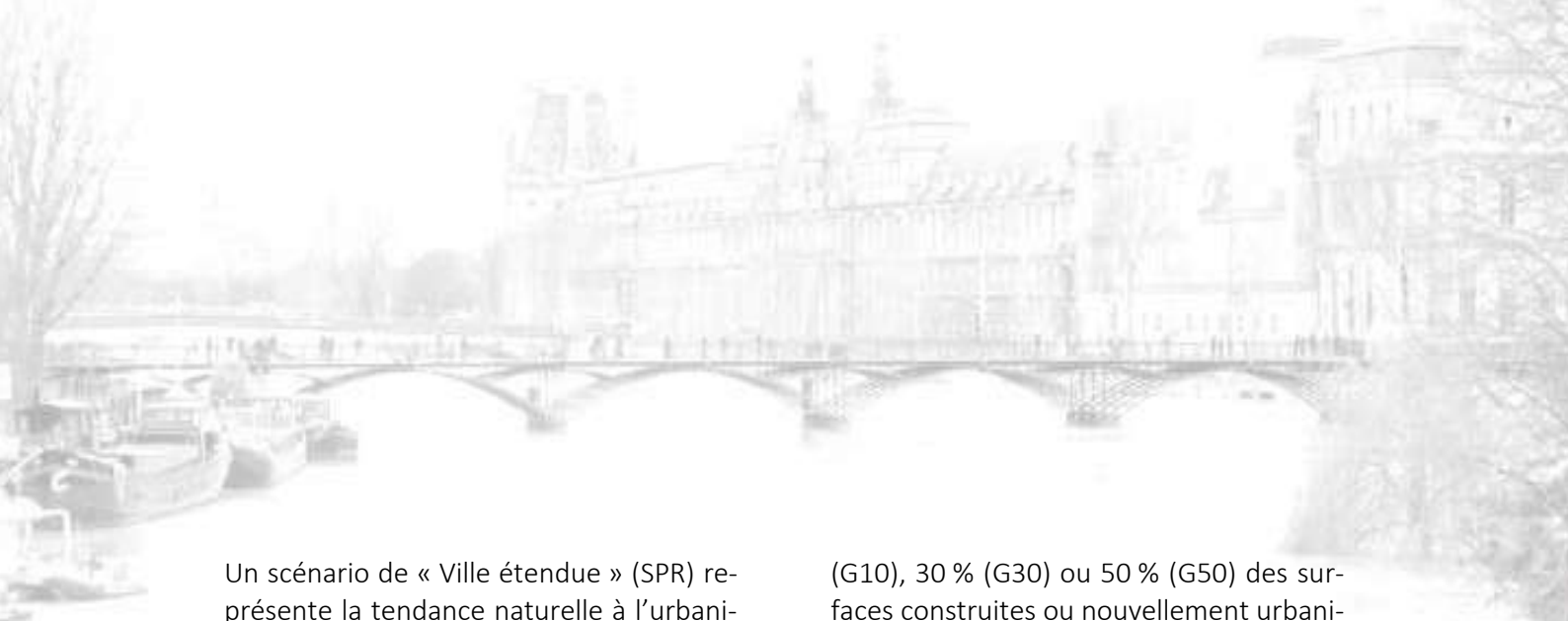


Figure 4. Cartes représentant le pourcentage de surface urbanisée pour cinq scénarios d'urbanisation prospectifs imaginés dans le projet VURCA. REF représente la zone urbaine simulée en 2008. Source : Lemonsu *et al.* (2015).

²¹ Lemonsu A, Viguié V, Daniel M, Masson V (2015) Vulnerability to heat waves : Impact of urban expansion

scenarios on urban heat island and heat stress in Paris (France). Urban Climate, 14:586-605.



Un scénario de « Ville étendue » (SPR) représente la tendance naturelle à l'urbanisation, dans la poursuite des tendances historiques. Un scénario de « Ville Compacte » (COM) illustre la mise en place de politiques strictes de contrôle de l'étalement urbain et de protection des zones naturelles et agricoles à partir de 2020, qui ne permet le développement urbain que par une densification des espaces bâtis existants. Trois scénarios prospectifs de « Ville verte » sont construits pour comprendre l'effet de politiques reposant uniquement sur une végétalisation de 10 %

(G10), 30 % (G30) ou 50 % (G50) des surfaces construites ou nouvellement urbanisées sous forme de parcs urbains.

Le résultat de ces scénarios d'urbanisation est une extension urbaine plus importante dans les scénarios de « Ville verte » que dans le scénario de « Ville étendue », dans lequel l'extension urbaine est elle-même plus importante que dans le scénario de Ville compacte. La population totale du territoire est la même pour tous les scénarios. En revanche, la distribution spatiale de la population dans la ville diffère selon le scénario d'urbanisation.

4.2 L'influence de l'urbanisation sur le climat régional

Pour l'influence passée, en région parisienne comme dans d'autres régions urbaines, les chroniques météorologiques historiques dont on dispose sont trop courtes, ou discontinues, ou de qualité trop incertaine, pour soutenir l'analyse des tendances et l'attribution au changement climatique et à l'urbanisation. Cette question d'attribution d'une partie de la tendance de température historique à l'urbanisation a d'ailleurs très peu été étudiée à l'échelle de la région Île-de-France ou bien de la France, tant la recherche s'est axée sur les études d'impact et d'adaptation depuis la canicule de 2003, en réponse aux besoins urgents des acteurs locaux et de la société civile.

Pour le futur, Lemonsu *et al.* (2015) montrent que, quel que soit le scénario d'urbanisation,

l'îlot de chaleur urbain est toujours plus élevé la nuit et affecte préférentiellement le centre-ville. Son intensité et son extension spatiale sont modérément impactées par le processus de densification et le choix de la forme urbaine (expansion horizontale ou verticale). Mais la variation du risque de vague de chaleur avec la dynamique de densification ne se limite pas à l'effet sur l'îlot de chaleur urbain, et dépend également de l'exposition à la chaleur de la population. Comme la distribution spatiale de la population dans la ville varie avec le scénario, les résultats de simulation montrent que la ville compacte, en concentrant les habitants dans les zones les plus impactées par l'effet d'îlot de chaleur, amplifie la vulnérabilité globale de la population.



Les carnets du GREC francilien

Le climat francilien
et les grandes lignes
du changement climatique
en Île-de-France

Photo
unsplash.com

Maquette et mise en pages
Marie Pinhas, ICoM-IPSL
© GREC francilien, 2022